

推薦論文

カメラでの方角計測による位置推定の精度向上

川濱 悠^{1,a)} 勝間 亮¹

受付日 2018年6月7日, 採録日 2019年1月15日

概要: カメラを搭載したセンサノードを多数配置して形成する無線マルチメディアセンサネットワーク (WMSN: Wireless Multimedia Sensor Networks) が, 広範囲にわたる視覚データ収集の方法として期待されている. ノードの絶対座標の取得には GPS 受信機を利用することが多いが, 様々な要因で GPS 受信機が取得する位置情報には絶えずノイズが混入する. そこで本稿では, 360 度カメラによる全方位映像を併用した高精度な位置推定手法を提案する. 360 度カメラを搭載するセンサノードが, LED ライトを搭載するアンカノードの光信号をカメラで検出し, アンカノード (設置位置および設置方向が既知のノード) の方角を計測する. 複数のアンカノードの方角を計測することで, 幾何学的計算により自ノードの存在位置を精密に推定する.

キーワード: ワイヤレスセンサネットワーク, カメラ, ローカライゼーション

Improvement in Localization Accuracy by Optical Direction Measurement with Cameras

YU KAWAHAMA^{1,a)} RYO KATSUMA¹

Received: June 7, 2018, Accepted: January 15, 2019

Abstract: Wireless multimedia sensor networks (WMSNs), constructed from multiple sensor nodes with cameras, are expected to collect visual data over wide ranges. Existing studies have attempted to estimate the positions of nodes using Global Positioning System (GPS). To improve the accuracy of the estimations of node positions, we propose a new localization method using both GPS and images sensed by camera sensor nodes for WMSNs. Camera sensor nodes, with positions that are unknown measure the angles of LED light signals emitted by anchor nodes. Using the Images, nodes can calculate the distances from the anchor nodes. In addition, using the plural angle values, nodes can calculate their own position with high accuracy. We built a small WMSN test bed and measured the average estimation errors.

Keywords: Wireless sensor networks, Cameras, Localization

1. はじめに

近年, 多数のセンサノードを無線通信により相互接続する無線センサネットワーク (WSN: Wireless Sensor Networks) を用いた広範囲にわたるデータ収集が期待されている. 応用例としては, 温度, 降水量, 照度等の環境データの収集から, 地滑り検知 [1], 人物追跡 [2] 等の高度なモニタリングシステムまで, 多岐にわたる. WSN は IoT (Internet of Things) の要素技術の 1 つであり, IoT の高まりとともに

に注目を集めている. その中でも, カメラを搭載し映像を扱う WMSN (Wireless Multimedia Sensor Networks) は, たとえば屋外であれば農業用地の害獣監視, 屋内であればイベント会場の混み具合の監視や来場人数のカウント等の対象オブジェクトの発見や追跡を行うアプリケーションにおいて, 具体的かつ視覚的なデータを収集することが可能となり, 活躍が期待されている.

WSN では, 収集されたデータをシンクノードと呼ばれるノードに集約する. たとえば動物監視等のオブジェクト

¹ 大阪府立大学
Osaka Prefecture University, Sakai, Osaka 599-8531, Japan
^{a)} kuyuto_rivbeach9199@yahoo.co.jp

本論文の内容は 2017 年 9 月の情報処理学会関西支部支部大会で報告され, 同支部長により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である.

追跡アプリケーションの場合、集約したデータを解析して得られた情報は、どの位置にあるノードで得られたものかを示すための位置情報が必要である。また、ノードどうしが効果的に協調動作するためにも、すべてのノードの位置を把握することが必要である。このような理由により、WSNを構成するすべてのノードは設置座標が判明していなければならないが、必ずしも容易にすべてのノードの設置座標を特定できるわけではない。

WSNのノードを設置する際、事前に決めておいた位置に計画的に設置する方法と、空中から散布する等、極端な偏りが生じない程度にまばらに設置する方法の2通りがある。前者の場合は、ノード1つ1つに対して位置を緻密に計測しつつ設置するため時間と労力がかかる。その代わりに、すべてのノードの位置が最初から判明しているので推定する必要がない。一方で後者の場合、設置コストは抑えられるものの、設置直後の状態ではノードの位置が不明である。よってWSNを稼働させる前にノードの位置を推定する必要がある。ノードの位置を自律的に推定することができれば、手軽にWSNを導入できるという点で望ましい。そのため、本稿ではノードの自律的な位置推定手法に焦点を当てる。

WSNでは、あらかじめ決められた座標に寸分の狂いなくすべてのノードを設置することは非常に困難である。そのため、設置した後に何らかの位置推定手法を用いて座標を取得することで、実際に配置された位置を知る必要があり、その位置情報からたとえば監視領域が期待どおりになっているか確認すること等ができる。現在、位置推定の方法として広く利用されているGPS(Global Positioning System)では誤差が1[m]以上出ることがあり、カメラが物陰に隠れてしまう位置に存在すると誤判定される割合も高くなり、監視領域が期待どおりにないという誤った判断をしてしまう要因になってしまう。そのため、より精度の良い位置推定手法が求められる。そこで、WMSNの各ノードは基本装備として映像を収集するための全方位カメラ、低照度下撮影用のLEDライト、データ収集のための無線通信機を搭載していることに着目し、本稿ではこれらの搭載機器を利用した高精度なノードの位置推定手法を提案する。提案手法では、あらかじめ設置位置と設置方向が判明しているノード(以降、アンカノードと呼ぶ)がパルス発光し、位置推定を行うノードがカメラでパルスを撮影することで、アンカノードの方角を光学的に計測する。複数のアンカノードのパルスを撮影することにより、自己位置を絞り込む。提案手法はWMSNのノード設置から運用までの間に1度だけ位置推定を行うことが想定されているため、屋外であればパルス発光の観測条件が良い夜間や、屋内であれば消灯時を狙って、効果的に位置推定を行うことができる。

カメラを用いて光学的にノード位置を推定する手法の

位置推定精度を検証するため、模擬WMSNを構築して実験を行った。2つのフィールドで位置推定誤差を計測したところ、GPSのみを用いて位置推定を行う場合における平均誤差はそれぞれ1.41[m]および2.10[m]であったが、本稿で提案する位置推定手法では、平均誤差を0.11[m]、0.25[m]に抑制することができた。

2. 関連研究

WSNにおいて、各ノードの位置を自律的に推定する種々の手法が考案されている。これらの手法は、レンジフリー方式とレンジベース方式の2種類に大別できる。

レンジフリー方式は、ノード間の距離を測定することなく位置を推定する方式である。低コストかつ低消費電力という利点があるが、推定精度が悪い。Centroid法は、自ノードと直接通信可能なアンカノード集団の重心を自己位置とする[4]。DV-HOP法は、アンカノードからのホップ数をカウントし、ホップ数を距離と見なして自己位置を推定する[5]、[6]。いずれの手法も計算量、通信量ともに少なく抑えることが出来、ノードの位置が大まかに把握できればよいアプリケーションに適している。

レンジベース方式は、ノードどうし、もしくはノードと人工衛星ないしWiFiスポットとの距離や角度をもとに自己位置を推定する方式である。消費電力、コストが比較的大きくなるが、より精密な位置推定が可能である[7]、[8]。レーザー光や超音波を用いてノード間距離の測定を行う手法が存在する[9]、[10]。これらの方式はノード間距離を大きくとることができないが、位置推定の精度が良い。電波の到来角度(AOA: Angle of Arrival)を利用する手法は、電波の到来方角に基づき三角測量を行う[11]、[12]。少ないアンカノードで各ノードの位置推定が可能だが障害物が存在すると精度が大きく悪化する。到来時刻(TOA: Time of Arrival)を用いる手法は、電波の到来時刻の差より自己位置を推測する。広く普及しているGPSは、人工衛星からの電波の受信時刻を用いることで、各ノードの絶対位置を計算できる。RSSIを用いる方法は、通信用電波の受信強度を利用してノード間距離を計測する手法である[13]。WSNで用いるセンサノードは無線通信機能を持っていることが前提であるため、他のレンジベース方式との比較で推定精度は劣るものの、ノードに追加機器を搭載することなく位置推定を行うことが可能である。

以上のように、WSNで用いる位置推定方式は電波を利用したレンジベース方式が主流であるが、電波は干渉や回折等の影響が大きく、AOAすなわち他のノードの存在方角を精密に測定することは困難である。そこで、他のノードの存在方角を精密に測定するために直進性が高くカメラで捕捉可能な可視光を利用することを考えた。

カメラと光を利用した位置推定のWMSNの既存研究として、WMSNにおいてセンサノードのLEDライトを他の

ノードが捕捉することで、障害物の存在可能性を推定する研究がある [14]。この研究では障害物が発光するわけではないため、障害物の存在位置が精密に特定できない問題があった。それに対し、本研究では位置推定の対象物であるノードが発光できるため、発光位置を撮影画像により特定できることから [15], [16], ノードの存在位置を精密に求められることに着目した。以降、WMSNにおいて発光位置を特定することによる位置推定の高精度化の方法について述べる。

3. カメラを利用した位置推定手法

WSNの中でもマルチメディアデータを扱うことに特化したWMSNでは、動画や画像を扱うものであればカメラと低照度下撮影用のライトが標準装備され、音声を扱うものであればマイクが標準装備されると想定される。本稿では、動画や画像を扱うWMSNを対象とし、各ノードに搭載されている全方位カメラとライトを方角計測に利用することで、設置位置が特定されていないノード（以降位置推定ノードと表記）の相対位置を高精度に計測する手法を提案する。カメラを利用して計算できる座標はノード間の相対位置であるので、各ノードの絶対位置の計算に際しては、アンカノードが複数台必要となる。アンカノードはWMSN運用前にすでに設置されたノードのうちの3つ以上を選択し、人力で精密な座標を取得する。ただし、各アンカノードは他の2つ以上のアンカノードの電波が到達するようにすることを想定する。全方位カメラで動画や画像を扱うWMSNでは、2つのノードが至近距離に設置されることはほとんどないと考えられるため、アンカノードが1カ所に固まってしまう状況はないものとする。

WMSNを運用する際は、全方位カメラでとらえた動画を解析するにあたり、被撮影物がノードから見てどの方角に位置しているかという情報が必要である。そのため、ノードには水平方向に基準軸を設定しており、ノードの位置推定を行う際は、設置座標の情報とあわせてノード基準軸がどの方角を向いた状態で設置されているのかという情報も推定する。設置方向は電子コンパスを搭載することによっても計測可能であるが、提案手法ではカメラのみを用いて推定可能である。各ノードに搭載するGPS受信機による測位情報とカメラで取得する映像情報を併用することで、GPSのみを用いてノード位置を特定する場合より高精度なノード位置推定が可能となる。また、GPSによる測位およびカメラによる測位の両方ができなかった場合に備え、RSSIを計測することでノード間距離を推定する従来手法も補助的に用いる。

3.1 想定環境

本稿で提案する位置推定手法は、設置後にノード移動が発生しない固定ノードのみで構成されるWMSNを想定し

ている。また、WMSNは複数台の位置推定ノードと複数台のアンカノードで構成され、見通しの良い平地に展開されるものとする。各ノードは一意に割り振られた固有IDを有し、それぞれ全方位カメラ、低照度下撮影用のLEDライト、RSSI測定機能を有する無線通信機、およびGPS受信機が搭載されていることとする。

3.2 位置推定をするために必要な情報

ノード位置推定を実行するにあたり、事前に必要となる情報は次のとおりである。

- 各アンカノード (a_1, a_2, \dots, a_i) が設置されている2次元座標
 - 各アンカノードが設置されている方向
 - ノードが発する電波の距離1mにおけるRSSI値
- 本問題で最終的に求めるべき情報は次のとおりである。
- 各位置推定ノード (e_1, e_2, \dots, e_i) が設置されている2次元座標
 - 各位置推定ノードが設置されている方向

3.3 提案手法

各位置推定ノードの位置を推定する際に利用できる情報は次のとおりである。

- 全方位カメラにより計測する周囲ノードの方角
- GPS受信機により取得する自ノード座標
- RSSIにより計算される周囲ノードとの距離

光は電波と比べ直進性が強く、これら3つの情報の中では、周囲ノードの方角が最も精密に計測できる情報である。その一方で、光は障害物等の存在により容易に遮断されうるため、計測できない場合が想定される。GPSは4個以上の衛星を補足した場合に位置推定が可能となる。RSSIを用いたノード間距離測定は、ノードの電波を受信するかぎりつねに可能であるが、計測精度は最も悪い。

本節では、これら3つの情報を統合して位置推定を行う手法について述べる。位置推定は3つのフェーズからなり、これらを「カメラによる位置推定フェーズ」、「減衰定数推定フェーズ」、「複合位置推定フェーズ」と呼ぶ。最初のフェーズでは、全方位カメラで取得する方角情報のみを用いて各位置推定ノードの位置を計算する。続くフェーズで、方角情報の欠落等で位置推定ができなかったノードの情報を補うため、GPSやRSSIを用いて位置推定を行う。

3.3.1 カメラによる位置推定フェーズ

このフェーズでは、カメラで計測する方角情報のみを用いて位置推定を行う。位置推定の大まかな流れは次のとおりである。ただし、「準アンカノード」とは、設置座標および設置方向が判明した位置推定ノードのことをいう。

- (1) アンカノードおよび準アンカノードは、自分の座標をブロードキャストして座標データをノード間で共有する。

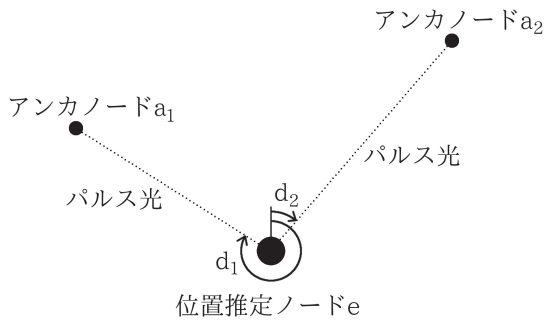


図 1 光学的な角度計測 (俯瞰図)

Fig. 1 The optical angle measurement (a bird's-eye view).

- (2) すべてのノードが LED ライトをパルス発光させる。このとき、点滅パターンにノード ID の情報を持たせることで、受光したノードが ID を解析できるようにする。
- (3) すべてのノードで、搭載している全方位カメラを用いて周辺の点滅光を探索する。点滅光を検出した場合は、点滅パターンを解析しノードの点滅光であるか否かを判断する。ノードから放たれた光であると判断できた場合は、ノード ID および点滅光の水平方向入射角 (以降は水平角と表記) を計測する。計測したデータはブロードキャストする。図 1 は位置推定ノード e がアンカノード a_1 および a_2 の水平角 d_1, d_2 を計測するときの概念図である。

- (4) 位置推定ノードは、得られた計測データをもとに自ノードの位置を計算する。位置が特定できれば、準アンカノードとなる。

これら一連の流れを、新たに準アンカノードが生成されなくなるまで繰り返す。ここで、異なる 2 つのアンカノード a_1 および a_2 と、位置推定ノード e が近傍に位置しているとき、手順 4 で e が自ノード位置を計算する際のアルゴリズムの具体例を以下に示す。

(i) 円弧の生成

e が a_1, a_2 の水平角を計測した場合、計測した水平角の差をとり挟角 $\angle a_1ea_2$ を求める。 $\angle a_1ea_2$ は、アンカノード a_1 と a_2 の水平角 d_1, d_2 を用いて式 (1) で与えられる。

$$\angle a_1ea_2 = \min(|d_1 - d_2|, 2\pi - |d_1 - d_2|) \quad (1)$$

ここで、2 点 a_1, a_2 および挟角が決定されることから、円周角の定理に従い、図 2 のような a_1, a_2 を両端とする円弧状の範囲に e の存在範囲を絞り込むことができる。この円弧の中心点座標および半径を計算する。 e が異なる 3 つ以上のアンカノードの水平角を計測できた場合、すべての異なる組合せについて、円弧の計算を行う。

(ii) 半直線の生成

a_1 が e の水平角を計測できた場合、 e の存在範囲は a_1

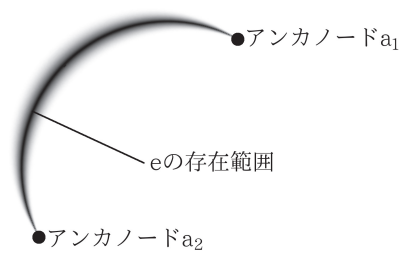


図 2 角度情報より絞り込まれる存在範囲

Fig. 2 The existence region narrowed by the horizontal angle information.

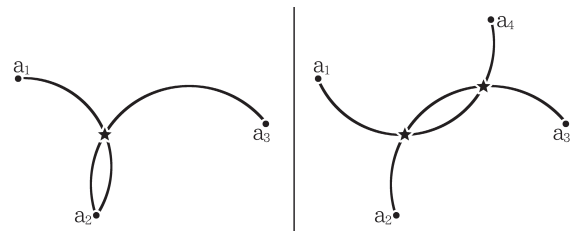


図 3 端点を共有する 2 円弧 (左) と共有しない円弧 (右)

Fig. 3 Two arcs sharing the end point (left) and those not shared (right).

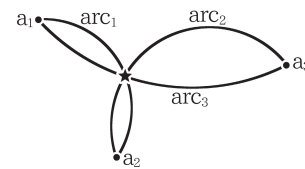


図 4 3 点から生成される 3 円弧

Fig. 4 Three arcs made by three end points.

を端点とする半直線状の範囲に限定される。この半直線の始点座標および傾きを計算する。 e の水平角を計測したアンカノードが複数あれば、そのすべてについて半直線の計算を行う。

(iii) 交点の生成

上記手順 i と ii において生成された円弧/半直線のうち、異なる 2 つを選び、その交点を求める。すべての組合せについて交点を求めるが、交点が存在しない組合せについては無視する。なお、円弧/半直線の組合せにより、交点が 1 つだけ生成されるものと 2 つ生成されるものがある。2 つの円弧の組合せで生成される交点は図 3 のように 2 種類存在するが、片方の端点 (アンカノード) を共有する組合せでは交点が 1 つに絞り込まれ、そうでない場合は 2 つの交点が生じられる。また、図 3 の左の組合せにおいては同一の交点を 3 回計算することになるので、重複してカウントしないよう配慮する。図 4 の 3 つのアンカノード a_1, a_2, a_3 の水平角から得られる 3 つの円弧 arc_1, arc_2, arc_3 を例にあげれば、これらの円弧を 2 つずつ組み合わせるとき 3 つの交点が計算可能であるが、いずれも同一の座標が得られるので 1 つの交点としてカウントする。

(iv) 交点の統合

手順 iii で計算された交点の重心を計算し、これを e の設置座標とする。ただし、交点が複数存在するものについては、交点座標の分散が小さくなる方を選択する。

(v) 設置方向の計算

a_1 の座標と手順 iv で求めた e の座標を用いると、 e から見たときの a_1 の方向が計算可能である。図で示すように、 a_1 の方向と e で計測した a_1 の水平角との差分をとると、 e の設置方向を計算することができる。 e が複数のアンカノードの水平角を計測している場合は、各アンカノードを用いて e の設置方向を計算し、その平均値を採用する。

3.3.2 減衰定数推定フェーズ

このフェーズは、RSSI の計測と RSSI 減衰定数の推定を行うフェーズである。RSSI を用いて距離測定を行う際は式 (2) がよく用いられるが、その場所固有の RSSI 減衰係数が必要となる。ここで、カメラによる角度計測で得られた位置情報を用いて RSSI 減衰定数の推定を行う。

$$D = 10^{-\frac{RSSI - RSSI_0}{N}} \quad (2)$$

D : 距離 [m]

$RSSI$: 計測した RSSI 値 [dBm]

$RSSI_0$: 距離 1m の地点での RSSI 値 [dBm]

N : RSSI 減衰定数

すべての位置計測ノードで、各アンカノードの電波の RSSI を記録する。カメラによる位置推定フェーズで推定位置を 1 カ所に決定した位置推定ノードは、精密な座標が判明していると仮定し準アンカノードとする。いまノード e が準アンカノードであるとき、カメラで推定した e の座標とアンカノード a_1 の座標を用いて、2 者間の推定距離 d_e を求める。また、アンカノード a_1 の電波の RSSI を計測し、式 (2) を用いて算出される距離が d_e となる RSSI 減衰定数を求める。通信可能なすべてのアンカノードに対してこの操作を行い、平均値を用いて RSSI 減衰定数を推定する。

3.3.3 複合位置推定フェーズ

このフェーズでは、カメラによる位置推定フェーズで推定したノード位置と、GPS ないし RSSI を用いて推定したノード位置の情報を統合する。カメラによる水平角計測で推定位置を 1 点に特定できたノードは、その位置をそのまま最終的な座標として採用する。一方、カメラで取得した情報のみで位置を特定できなかったノードは、水平角計測によって絞り込まれた存在範囲において、GPS もしくは RSSI により計算される推定位置から最もユークリッド距離が短い点を最終的な推定座標として採用する (図 5)。ここで、GPS 衛星を 4 つ以上補足したものは GPS の測位結果を計算に利用し、そうでないノードに関しては RSSI による位置推定結果を利用する。なお、RSSI を用いて位置

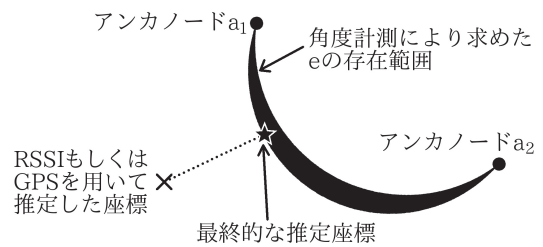


図 5 光学計測と GPS/RSSI の情報を併用した推定

Fig. 5 Position estimation using both RSSI and the camera.

推定を行う場合は、前項で述べた方法で推定した RSSI 減衰定数を用いる。

4. 精度評価実験

提案手法を評価するため、農業用地の監視やイベント会場の来場人数計測等の平地での利用を想定して、小規模な WMSN を模擬的に構築して位置推定を行った。精度の比較を行うため、GPS 受信機のみを用いた場合の位置推定結果もあわせて記述する。

4.1 実験手順

全方位撮影可能なカメラを搭載するノードを製作し、屋外に展開した。実験場所の選定にあたっては、フィールドの周囲 10m 以内に障害物が存在しない平地であることを条件とした。ここでパルス発光、水平角の計測、GPS 測位を行い、シンクノードで情報を収集・記録した。

なお、GPS での位置推定においては、各ノードに様々な要因で推定誤差が発生する。これらをキャンセルするため、本実験においてはアンカノードでも GPS 計測を行い、これを基準点として利用することで位置推定ノードの GPS 測位結果を補正した。これにより、各ノードに等しく表れる推定誤差を軽減できるが、個々のノードごとに発生する推定誤差については軽減することができない。

4.2 WMSN の設定

位置推定精度を検証するにあたり、2 種類の WMSN を設定した。また、実際の場面では、提案手法が機能する最低限の 3 つのアンカノードだけを使用せざるを得ない場合も存在すると考えられる。たとえば、屋外の農業用地のモニタリングであれば背の高い作物や支柱等が邪魔になったり、屋内のモニタリングであれば物品をアンカノードの前に積んでしまったりするアクシデントが考えられる。そこで、障害物が存在する環境に WMSN が展開される場合を想定し、一部の計測データを欠落させた状態でも位置推定の計算を行った。具体的な計算方法としては、通常の状態で行った実験で得られたデータから、該当ノードが放った光を撮影して得た水平角データおよび該当ノードのカメラで収集した水平角データを削減して位置推定の計算を行うと

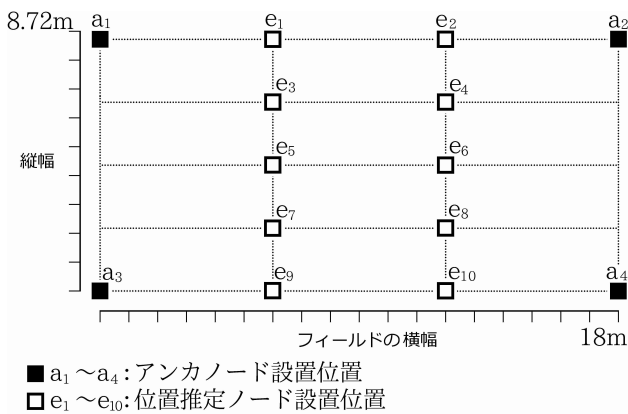


図 6 フィールド 1 のノード配置

Fig. 6 Configuration for the experiments in field 1.

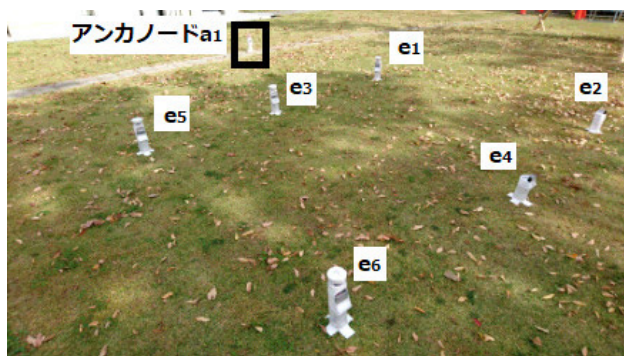


図 7 フィールド 1 における実験の様子

Fig. 7 The experiments in field 1.

いう手順をとった。

4.2.1 フィールド 1 の設定

フィールド 1 では、純粋に提案手法の位置推定精度を評価するため長方形フィールドを設定した。8.72[m] × 18[m] の長方形の 4 頂点にアンカノードを配し、その内部に位置推定ノードを配置した。フィールド 1 でのノード配置座標を図 6 に示す。また、フィールドの様子を図 7 に示す。

4.2.2 フィールド 2 の設定

フィールド 2 では、あえて提案手法に対してより厳しい条件となるフィールドを設定した。提案手法はノード間の相対位置を求めるものであり、絶対位置はアンカノードとの相対位置として求められる。各アンカノードから離れた場所に設置された位置推定ノードは、アンカノードとの間で十分な光学計測ができないことがあり、アンカノード位置から自身のノード位置を直接計算できない場合がある。こういった状況では、より近くに位置する他の位置推定ノードの推定位置を頼りに位置推定を行うため、推定を重ねるごとに誤差が蓄積する。これは、基本的にアンカノードを用いて位置推定する限り避けることはできない。そのため、フィールド 2 では意図的にこのような状況を再現し、誤差がどのように増大するかを評価し、どのような環境で GPS の性能を下回るのかを調査した。8.72[m] × 18[m] のフィールドにおける各ノードの配置座標を図 8 に示す。12

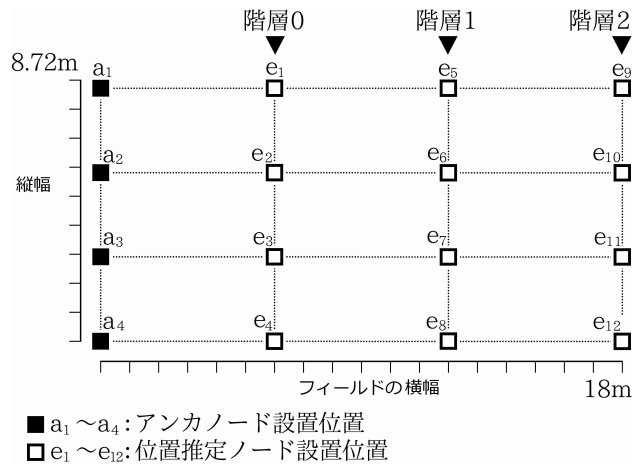


図 8 フィールド 2 のノード配置

Fig. 8 Configuration for the experiments in field 2.

点ある位置推定ノードに、階層を設定し、実験の様子から GPS の性能を下回る場合が初めて出てくる 3 段階を最大とした。階層は、位置推定におけるアンカノードからのホップ数のような指標である。アンカノードとの光学計測のみで自身の位置推定が可能な位置推定ノードの階層を 0 と設定する。アンカノードとの光学計測のみでは位置を特定できないが、階層 0 の位置推定ノードの推定座標も用いると位置が定まるノードの階層を 1 と設定する。以降、自身の位置推定をする際に経由する位置推定ノードの数が増えるごとに階層の値も 1 大きくする。ここでは、階層と誤差の関係を明確にするため、階層 1 のノードは階層 0 のノード位置情報のみを用いて位置推定を行うようにした。同様に、階層 2 のノードは階層 1 のノード位置情報のみを用いて位置推定を行った。

4.2.3 ノードの仕様

製作した位置推定ノードの仕様を表 1 に、外観を図 9 に、実際の写真を図 10 に示す。ノードの部品は、安価で入手性良いことを重視して選定した。全方位カメラは、汎用カメラモジュールと半球ミラーを組み合わせることで代替した。ノード設計において、半球ミラーをノード天頂部に取り付けることを最優先したため、GPS アンテナを天頂部に取り付けることが不可能となった。この制約の下、GPS アンテナから上空を見上げた際の遮蔽物が小さくなるよう配慮した結果、GPS アンテナは最下部に設置した。なお、今回使用した GPS 受信機は NEO-6M であり、日本の準天頂衛星システム「みちびき」には非対応である。

本ノードのシステムブロック図を図 11 に示す。カメラおよび GPS 受信機は RaspberryPi に接続されている。RaspberryPi はカメラ画像を 105 [ms] ごとに読み込み、ピクセルごとに明暗の変化を検知する。明暗のパターンが 4.2.4 項に後述するライトの点滅ルールと合致するかを調べ、点滅ルールと明暗の変化について 1 周期の合致が見られれば、明暗の変化をビットに変換してノード番号の情

表 1 ノードの仕様

Table 1 The nodes specification.

搭載機器の仕様	
マイクロコントローラ	ATMega328P-AU
水平角計測用計算機	Raspberry Pi2 Model B
撮影用カメラ	Raspberry Pi Camera
カメラ最大解像度	2,592 × 1,944 [px]
GPS 受信機	NEO-6M
無線通信機	IM920
撮影用ライト	白色 LED1 灯
ライト消費電力	約 1.1 [W]
電源	単 3 形アルカリ乾電池 4 本
ノード寸法 [mm]	140 × 154 × 294
筐体の材質	PLA 樹脂
内部設定	
カメラ画像処理解像度	960 × 720 [px]
1 フレームの設定時間	105 [ms] (9.5 FPS)
ライト点滅の単位時間	150 [ms]
GPS 測位の LPF 値	0.1

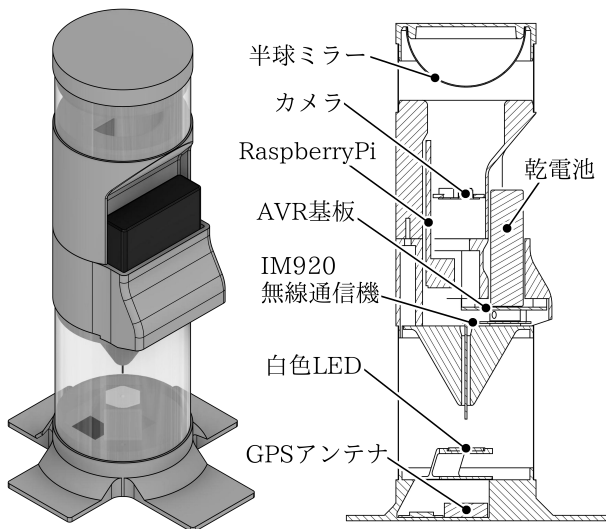


図 9 ノードの俯瞰図 (左) と断面図 (右)

Fig. 9 The cross section of the node.

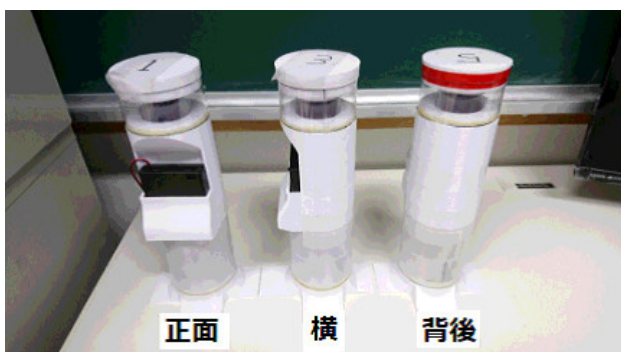


図 10 ノードの写真

Fig. 10 The photo of the nodes.

報を得る. ノード番号の情報が得られたら, 座標から水平角を求めて記録する. また, RaspberryPi は GPS 受信機で取得した緯度情報の外れ値を除去し, 精度を高めるため

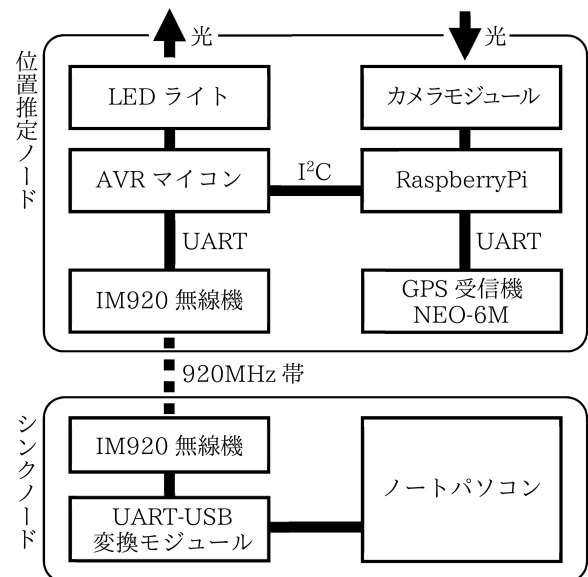


図 11 ノードのシステムブロック図

Fig. 11 System block diagram of the nodes.

式 (3) で表されるローパスフィルタをかけて平滑化する. 経度についても同様の処理を行う.

$$Lat(LPF)_i = Lat(raw)_i \times t + Lat(raw)_{i-1} \times (1 - t) \quad (3)$$

$Lat(LPF)_i$: 平滑後の i 番目の緯度情報

$Lat(raw)_i$: GPS 受信機で取得した i 番目の緯度情報

t : ローパスフィルタの強度 ($0 < t \leq 1$)

AVR マイクロコントローラは無線通信制御とライトの制御を行う. RaspberryPi が処理したデータを I²C バス経由で受信して保持し, 他ノードと無線送信タイミングが重ならないよう同期をとりながら無線送信を行う. また, 他ノードの電波を受信した際は RSSI の記録を行う. これと同時に, 割り込みを用いて LED の点滅制御も行う. なお, 機材の都合上アンカノードは位置推定ノードから RaspberryPi およびそれに付随する機器 (カメラ, GPS 受信機) を省略したものを使用した. これにより, アンカノードは水平角計測機能と GPS 測位機能が削減されているが, その他の機能については位置推定ノードと同一である. また, カメラのキャリブレーション情報を除き, すべてのノードは同一のプログラムで動作させた.

4.2.4 撮影用ライト点滅ルール

本実験では確実な光学計測を行うため, RaspberryPi による画像処理には相当量の余裕を見込み, 1 フレームあたり 105 [ms] を割り当てた. そのため, 光の点滅でノード番号を伝達するにあたり非常に低速なプロトコルが必要となったので, 以下のように, 点灯/消灯をビット列に見立てた単純な点滅ルールを設定した.

- 信号は, 短点灯, 長点灯, 短消灯, 長消灯, 開始シグ

表 2 点滅ルールにおけるメッセージ一覧

Table 2 The flashing protocol.

番号	ビット列 (1:点灯)
00	11101000
01	10101000
02	10100010
03	11100010
04	10101110
05	11101010
06	10001110
07	10001000
08	10001010
09	10111000
10	10111010
11	10101010

ナル (超長消灯) の 5 種類とする.

- 8 ビットからなるメッセージを設定する.
- 点滅パターンの 1 周期は, 開始シグナルとメッセージ 3 つで構成される.
- ノード番号にかかわらず, 平均点灯時間を一定にする.
- 点滅の単位時間を 150 [ms] とする.

それぞれ, 短点灯/短消灯は 1 ビット, 長点灯/長消灯は 3 ビット, 開始シグナルは 6 ビットの長さである. 1 周期には 8 ビットのメッセージが 3 つ含まれるので, 合計の長さは $6 + (8 \times 3) = 30$ ビットである. メッセージは表 2 の 12 通りを設定した. 1 周期に 3 回メッセージの送信を行うが, 今回は 3 回とも同じ情報を送信する設定としたので, 伝えられる情報の総数つまり最大ノード数は 12 である. 同じ情報を繰り返し送信することで効率は落ちるが偽陽性は発生しにくい. ノード番号が i のときの, 1 周期のビット列全体は式 (4) のようになる.

$$ss + m_i + m_{(i+2) \bmod 12} + m_{(17-i) \bmod 12} \quad (4)$$

ss : 開始シグナル (6 ビット消灯)

m_i : i 番のメッセージ (8 ビット)

ここで, メッセージ番号をずらしているのは平均点灯時間を一定にするためである. 具体例をあげると, ノード番号 0 のビット列は “000000111010001010001011101010” であり, 該当するノードは LED ライトを点滅させてこのビット列を繰り返し送信する.

4.3 実験結果

4.3.1 フィールド 1 での推定精度の評価

この実験では, アンカノード a_3 の座標を (0,0) と設定し, 実際の配置におけるメートル単位の距離と一致させるように, 他のアンカノード a_1, a_2, a_4 の座標をそれぞれ (0, 8.72), (18.0, 8.72), (18.0, 0) に設定した. これらアンカノードの座標と, 各ノードごとに検出したパルス発光の方

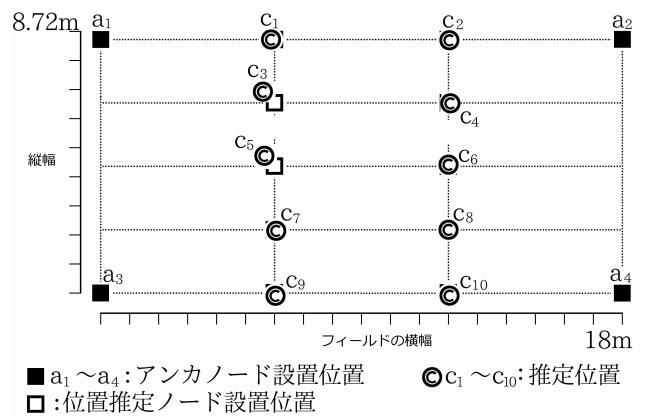


図 12 提案手法の推定結果座標 (フィールド 1)

Fig. 12 The positions calculated using the proposed method (Field 1).

表 3 提案手法での推定結果 (フィールド 1)

Table 3 The coordinates calculated using the proposed method in field 1.

	推定座標 [m]	実際の座標 [m]	誤差 [m]
c_1	(5.84, 8.72)	(6.00, 8.72)	0.16
c_2	(12.03, 8.69)	(12.00, 8.72)	0.04
c_3	(5.77, 6.67)	(6.00, 6.54)	0.26
c_4	(12.08, 6.53)	(12.00, 6.54)	0.08
c_5	(5.85, 4.50)	(6.00, 4.36)	0.21
c_6	(12.00, 4.40)	(12.00, 4.36)	0.04
c_7	(6.05, 2.12)	(6.00, 2.18)	0.08
c_8	(12.00, 2.18)	(12.00, 2.18)	0.00
c_9	(6.03, -0.09)	(6.00, 0.00)	0.10
c_{10}	(12.02, -0.07)	(12.00, 0.00)	0.09
平均誤差			0.11

角とビットパターンの情報から, 3 章で述べた方法で各ノードの座標を計算した. 提案手法における各ノードの実際の座標と推定座標の情報を Microsoft Excel でプロットしたものを図 12 で示す. さらに, 各ノードの推定座標と誤差を表 3 にまとめた. 位置推定誤差の平均をとると 0.11 [m] となり, 各位置推定ノードの推定誤差の最小は 0.00 [m], 最大は 0.26 [m] であるため, すべての位置推定ノードにおいて推定誤差を 1 [m] 未満に抑えることができた. 各位置推定ノードと各アンカノード間の見通しが良く, 各位置推定ノードから見て全周囲にアンカノードが配置されているので, 角度情報を利用する提案手法のアルゴリズムが有効に働いた結果だと考えられる.

続いて, a_1 から a_4 までの各アンカノードについて, これが障害物によって遮られた状況を想定し, 該当ノードの情報を利用せず位置推定の計算を行った. その結果を表 4 に示す. 各位置推定ノードの推定誤差の最小は 0.02 [m], 最大は 0.31 [m] であり, いずれの場合であっても位置推定の平均誤差は 1 [m] 未満であり, 障害物が存在しない場合と同等の誤差レベルを維持できた. このことから, 位置推定

表 4 提案手法での推定結果 (フィールド 1・障害物あり)

Table 4 The average error calculated using the proposed method in field 1 (with an obstacle).

欠損ノード	平均誤差 [m]
a_1	0.08
a_2	0.08
a_3	0.06
a_4	0.10

表 5 提案手法での推定結果 (フィールド 2)

Table 5 The average error calculated using the proposed method in field 2.

ノード階層	平均誤差 [m]
0	0.09
1	0.23
2	0.42
総合平均	0.25

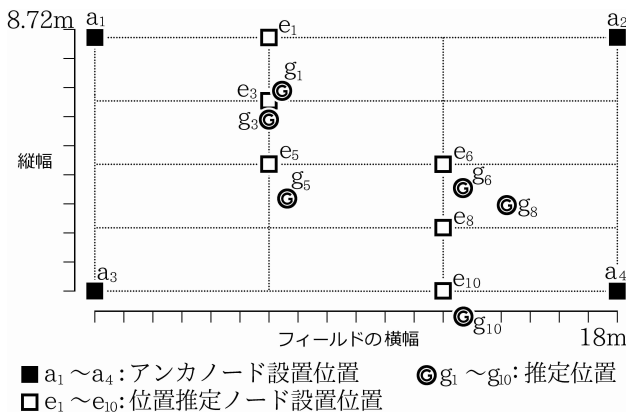


図 13 GPS の推定結果座標 (フィールド 1)

Fig. 13 The positions calculated using GPS (Field 1).

に利用できるアンカノードの数が3つ以上確保されていれば、高い精度を保って位置推定を行うことが可能であるといえる。ここではノードを格子状に配置しているが、3章で述べたノードの配置条件を満たしつつ、各位置推定ノードからアンカノードの発光が観測可能であれば、ノードの配置は推定精度にはほぼ影響を及ぼさないと考えられる。

GPSを利用してノード位置推定を行った結果を図13に示す。なお、GPS受信機を持つノードは $g_1, g_3, g_5, g_6, g_8, g_{10}$ である。今回使用するGPSは特殊な条件下ではなく、一般的にも広く使用されているものと同様の環境で使用しており、GPSの衛星捕捉数は8から10であり著しく精度を欠く条件ではないため、この数で十分であると判断した。この実験では、すべてのアンカノードと位置推定ノードでGPS測位を行った。アンカノードの緯度経度情報を基準として、位置推定ノードの緯度経度情報から座標を算出し、図中にプロットした。誤差をできるだけ最小化するために、最小二乗法により各ノードの位置誤差が最も小さくなるようにアンカノードの経度と緯度の基準を設定した。今回の実験における経度と緯度の基準は、座標(0,0)に位置するアンカノード a_3 が緯度34.549231, 経度135.505269であった。GPSを用いた測位の平均誤差は1.41[m]であり、最小と最大の誤差は0.64[m]~2.36[m]であった。

すべてのノードで、GPS測位座標は時間の経過とともにドリフトがみられた。1[sec]単位で発生する細かなノイズはローパスフィルタで除去できたが長周期的なドリフトは除去できなかった。これを軽減するには、常時GPS測位を

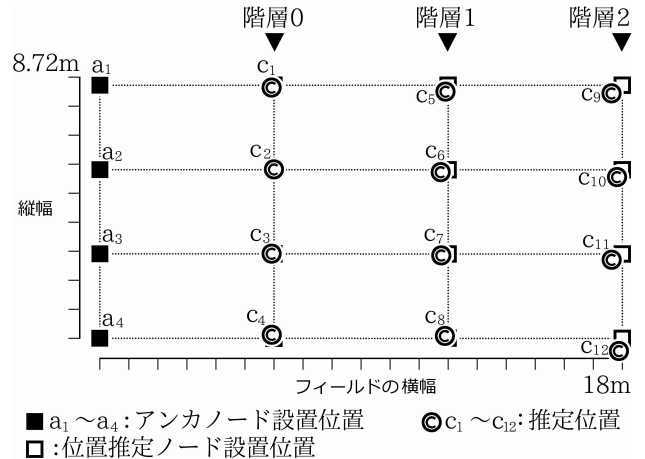


図 14 提案手法の推定結果座標 (フィールド 2)

Fig. 14 The positions calculated using the proposed method (Field 2).

行いリアルタイムで誤差修正情報を生成する基準点を設ける方式(ディファレンシャルGPS)を構築する必要がある。

また、日本の準天頂衛星システムみちびきによってGPSが高精度化しても、屋内で使用できない問題がある。それに対し、提案手法は屋内で現行のGPSよりも良い精度で位置推定可能であると考えられる。

4.3.2 フィールド 2 での推定精度の評価

フィールド 2 において提案手法を用いた位置推定の結果を表 5 および図 14 に示す。各位置推定ノードの推定誤差の最小は0.00[m]、最大は0.48[m]であり、すべての階層のノードで位置推定誤差を1[m]未満に抑えることができたが、階層が深くなるにつれ誤差が増加していくことが示された。

フィールド 1 と同様、ノードが障害物に覆われている状況を想定して位置推定を行った。フィールド 2 では、最初に4つのアンカノード $a_1 \sim a_4$ を用いて4つの位置推定ノード e_1, e_2, e_3, e_4 の位置推定を行い、順次位置推定ノードを準アンカノードとして4つずつノードの位置推定を行った。ここでは、それぞれの階層で位置推定を行う際に推定に用いる4つの(準)アンカノードのうち1つを利用不可能と想定し、3つだけのノードを用いて計算した。すべての組合せについて位置推定を行ったときの誤差の平均値を表 6 に示す。1階層あたりの誤差の増加率はさほど大きくはないが、階層 2 のノード群の平均誤差が障害物がない場

表 6 提案手法での推定結果 (フィールド 2・障害物あり)

Table 6 The average error calculated using the proposed method in field 2 (with an obstacle).

ノード階層	平均誤差 [m]
0	0.12
1	1.02
2	3.56
総合平均	1.57

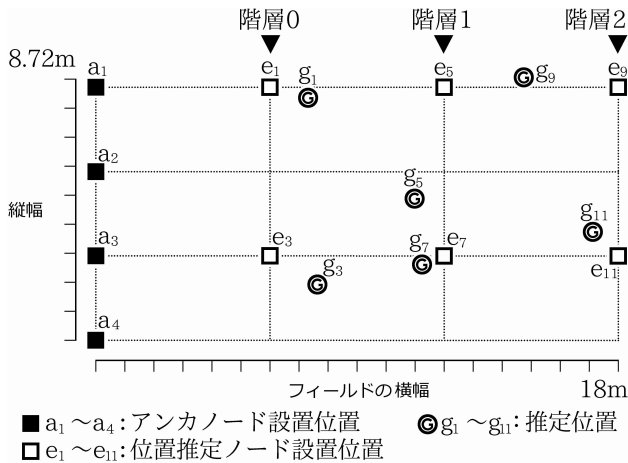


図 15 GPS の推定結果座標 (フィールド 2)

Fig. 15 The positions calculated using GPS (Field 2).

合と比較して大きく悪化していることが分かる。もしノードが格子状ではなく、ランダムに配置されていた場合、準アンカノードとして使用できるノードの方角に偏りが生じる可能性があり、その場合はさらに精度が悪化してしまうと考えられる。

GPS を利用したフィールド 2 での位置推定結果を図 15 に示す。GPS 受信機を搭載したノードは、配置に極端な偏りが出ないように奇数番号の位置に配置した。フィールド 1 での計測時と同様、GPS 測位座標は時間の経過とともにドリフトがみられた。フィールド 1 の実験よりも計測に時間を費やしたこともあり、誤差の影響を強く受けて推定精度はフィールド 1 より悪化した。その結果、フィールド 2 での GPS 測位の平均誤差は 2.10 [m] であり、最小の誤差は 0.83 [m]、最大の誤差は 4.01 [m] であった。提案手法の結果と比較すると、障害物がある環境で、階層 2 の推定を行う場合に初めて GPS の性能の方が良くなることが分かった。このことから、障害物によってアンカノードが 1 つ使用不可能な環境でも、階層数が 1 までのノードの位置推定は提案手法の方が GPS よりも良い精度を保てることが分かった。

4.4 提案手法の改善点の考察

本章では、実験を通して判明した事柄から、さらなる提案手法の利便性向上の可能性について、誤差の発生要因と計算の高速化の面で考察、検討する。

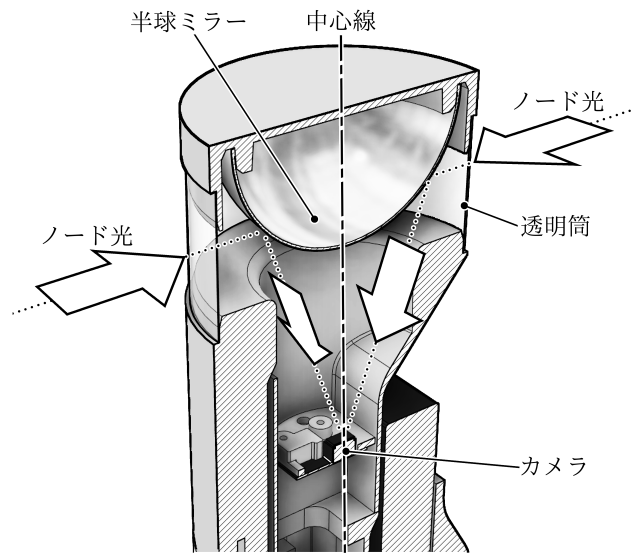


図 16 ノードの全方位カメラ拡大図 (断面図)

Fig. 16 Schematic diagram of the 360-degree camera.

4.4.1 提案手法の誤差発生要因

提案手法は光の持つ直進性ゆえ精密な角度計測が可能であるが、計測誤差の発生は避けられない。実験を通して判明した主な誤差発生要因を以下にあげる。

- カメラ光軸のずれ

図 16 は、本実験で用いたノードの全方位カメラ部分の断面図である。全方位カメラは円筒形をしており、円筒の中心線とカメラの光軸が同一直線となるよう設計した。また、光軸上に半球ミラーの中心点が位置するようにした。製作過程において、カメラの光軸やミラーの取付位置に大小のずれが生じるので、各ノードは実験を行う前にキャリブレーションを行った。具体的には、ノード組立時にカメラで撮影を行い、較正值として撮影画像上での半球ミラー中心点の座標をプログラムに書き込んだ。この較正值に誤差があれば、角度計測に誤差となって表れる。中心座標の設定が 6 [px] ずれると最大で角度計測に 1 度のずれが生じる。

- 透明筒/半球ミラーの平滑度

図 16 で示すように、周囲ノードが放つ光は透明筒を透過し半球ミラーで反射した後カメラへ入射する。透明筒の表面の平滑度合いや半球ミラーの表面の平滑度合いが低くなると、光が理想的な経路からずれた経路を通過してカメラに入射するため、角度計測に誤差が生じる。

- 量子化誤差

カメラで周辺ノードの光をとらえる際、水平角の情報はイメージセンサのピクセルの座標という形で与えられる。ここでデジタル化にともなう量子化誤差が発生する。カメラを高解像度のものにすれば誤差を軽減することができるが、カメラのコスト増大、計算コストの増大等のデメリットがある。本実験では、カメ

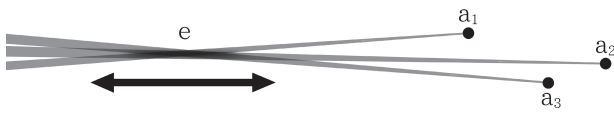


図 17 アンカノード方向の偏りによる精度悪化

Fig. 17 Accuracy deterioration due to bias of the anchor nodes.

ラ画像を処理する際の解像度を 960×720 [px] に設定した。実験で用いたノードのカメラで撮影した画像において、仰角 0 度（真の水平）で入射した光の集合は半球ミラー上の円として現れるが、カメラ解像度 960×720 [px] のとき、円の半径が 310 [px] となった。換算すると 0.185 [度/px] となり、これが本ノードでの角度計測の分解能となる。

● アンカノード方向の偏り

各位置推定ノードは、アンカノードと相互に光学計測して得た水平角情報をもとに座標計算を行う。距離情報を用いることなく角度情報のみを利用して位置推定を行う手法の欠点として、アンカノード方向の偏りに弱いことがあげられる。図 17 のように、位置推定に利用できるアンカノード群 a_1, a_2, a_3 が位置推定ノード e から見て同じ方向に偏っている場合、アンカノード群と位置推定ノード間の距離方向の精度が不足する。これを防ぐため、WMSN 中のアンカノードはできるだけ分散させて配置する必要がある。

4.4.2 角度計測高速化の検討

提案手法は固定ノードのみで構成される WMSN に対して、ノード配置から運用までの間に 1 度だけ位置推定を行うことを想定しており、ノード位置推定に時間制限がないと考えてよいことから、多少の時間を要する代わりに精度の良いアルゴリズムを提案した。実験ノードに実装したプログラムでは、1 回の水平角計測に 9.0 [sec] もの時間を要する。これは以下の式 (5) によって導き出される時間である。

$$T = 2 \times L \times F_{LED} = 2 \times 30 \times 0.15 = 9.0 \quad (5)$$

T : 1 回の水平角計測にかかる時間 [sec]

L : 点滅ルールの 1 周期のビット数

F_{LED} : 点滅ルールの単位時間 [sec]

4.2.4 項で述べたルールでは、1 周期のビット数 L が 30、点滅の単位時間 F_{LED} が 0.15 [sec] であるから、1 周期にかかる時間 T は 4.5 [sec] となる。水平角計測に最も時間を要するのは、点滅パターン先頭の開始シグナルの途中で点滅検知を開始した場合である。この場合は開始シグナルを検出できずその周期のデータを読むことができないので、次の周期の点滅が完了するまでノード番号の解析ができない。そのため、最大で 2 周期分の時間、つまり 9.0 [sec] の時間を要することになる。

$$F_{LED} \simeq F_{flame} \times 1.4 = 0.105 \times 1.4 \quad (6)$$

F_{LED} : 点滅ルールの単位時間 [sec]

F_{flame} : 画像解析の 1 フレーム時間 [sec]

なお、点滅の単位時間 F_{LED} は、式 (6) のとおり、画像解析における 1 フレーム時間 F_{flame} の 1.4 倍の時間に設定している。1 ビット単位の点滅を確実に検出するためにはフレーム時間より点滅単位時間の方を長くする必要があるからである。 F_{flame} を決定する主な要因として、以下の要素があげられる。

- SoC の処理性能
- カメラの性能
- カメラを接続するバスの転送能力
- LED の応答性

LED の応答性は他の項目と比べると十分に高速なので無視できる。実験で用いたカメラとバスで決まる最大フレームレートは 30 [FPS] なので、 F_{flame} は 0.033 以上の値にしなければならない。

実験で用いた RaspberryPi2 Model B の SoC は BCM2836 であり、900 MHz 動作する ARM Cortex-A7 プロセッサを 4 コア搭載している。実装したプログラムはシングルスレッドで動作し、設定した F_{flame} の時間内に処理が終わるとスリープしてタイミング調整を行う。 F_{flame} は余裕を見て 0.105 [sec] の設定としたが、実際に 1 フレームの処理にかかる時間は 0.070 [sec] 程度であったので、30% 程度の高速化の余地が残されている。さらに画像処理を複数スレッドに分割する等の工夫を施せば、 F_{flame} は 0.050 [sec] 程度まで短縮できると考えられる。

WMSN の応用例は多岐にわたるため、位置推定手法は移動ノードに対応していることが望ましい。 F_{flame} が 0.050 [sec] であれば、高速移動する点滅光はロストしてしまい追跡に失敗する可能性が高いものの、低速移動するノードに対しては水平角計測を行うことが可能であると考えられる。現状では、誤検出を避けるため 1 周期に同じ情報 (メッセージ) を 3 度送信するが、これを 2 回とすることで L を 22 ビットまで減らすことも可能である。 F_{flame} の短縮および L の短縮を行うと、現在のハードウェアを利用したまま 1 回の水平角計測要する時間 T を 3.1 [sec] 程度に短縮できると考えられる。

5. まとめ

本稿では、ノードに全方位カメラを搭載する WMSN において、WMSN ノードの撮影用ライトを点滅させつつカメラを光学的な方向計測を行うセンサとして利用することで、光学的な角度計測を行い、位置推定の精度を向上させる手法を提案した。実際に模擬 WMSN を構築し評価実験を行ったところ、ノード間距離が数 [m] 程度の小規模な WMSN では、障害物が存在しない理想的な環境において、位置推定誤差が GPS の 1 割程度ときわめて高精度な位置

推定ができた。また、アンカノードを用いて直接位置推定できないノードであっても、他の位置推定ノードを経由する回数が2回程度であればGPSと同等以上の精度を保ちつつ位置推定できるという結果を得た。提案手法を害獣検知WMSN等動物のモニタリングに応用する場合は、白色LEDライトを動物に対して不可視な赤外線LEDに置き換える等の工夫が必要になるが、獣道の特定に役立つ程度に高精度な位置情報を得ることができると考えられる。

参考文献

[1] 岩井将行, 今井大樹, 西谷 哲, 小林正典, 戸辺義人, 瀬崎 薫: iPicket: 無線センサ杭を用いた地滑り計測, モバイルコンピューティングとユビキタス通信研究会研究報告, Vol.2010-MBL-52, No.1, pp.1-7 (2010).

[2] Walchli, M., Skoczylas, P., Meer, M. and Braun, T.: Distributed Event Localization and Tracking with Wireless Sensors, *Proc. 5th International Conference on Wired/Wireless Internet Communications (WWIC 2007)*, pp.247-258 (2007).

[3] 川濱 悠, 勝間 亮: カメラでの方角計測による位置推定の精度向上, 情報処理学会研究報告, 2017年度情報処理学会関西支部支部大会, 8 page (2017).

[4] Blumenthal, J., Grossmann, R., Golatowski, F. and Timmermann, D.: Weighted Centroid Localization in Zigbee-based Sensor Networks, *Proc. 2007 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP 2007)*, pp.1-6 (2007).

[5] Chen, H., Sezaki, K., Deng, P. and So, H.C.: An Improved DV-Hop Localization Algorithm for Wireless Sensor Networks, *Proc. 3rd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA 2008)*, pp.1557-1561 (2008).

[6] Xiao, H., Zhang, H., Wang, Z. and Gulliver, T.A.: An RSSI based DV-hop algorithm for wireless sensor networks, *Proc. 2017 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing (PacRim)* (2017).

[7] Han, G., Jiang, J. and Zhang, C.: A Survey on Mobile Anchor Node Assisted Localization in Wireless Sensor Networks, *Journal of IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol.18, No.3, pp.2220-2243 (2016).

[8] Iliev, N. and Paprotny, I.: Review and Comparison of Spatial Localization Methods for Low-Power Wireless Sensor Networks, *IEEE Sensors Journal*, Vol.15, No.10, pp.5971-5987 (2015).

[9] Savvides, A., Han, C.-C. and Strivastava, M.B.: Dynamic Fine-Grained Localization in Ad-Hoc Networks of Sensors, *Proc. 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '01)*, pp.166-179 (2001).

[10] Ward, A., Jones, A. and Hopper, A.: A New Location Technique for the Active Office, *Journal of IEEE Personal Communications*, Vol.4, No.5, pp.42-47 (1997).

[11] 辻 宏之: アレーアンテナを用いた屋内外の無線局位置推定の実験的検証, 電子情報通信学会論文誌 B, 通信, Vol.J90-B, No.9, pp.784-796 (2007).

[12] Peng, R. and Sichertiu, M.L.: Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks, *Proc. 3rd Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks (SECON2006)*, pp.374-382 (2006).

[13] Mistry, H.P. and Mistry, N.H.: RSSI Based Localization Scheme in Wireless Sensor Networks: A Survey, *Proc. 2015 5th International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies (ACCT2015)*, pp.647-652 (2015).

[14] 勝間 亮, 柴田直樹, 山本真也: カメラモニタリング向けセンサノードの発光による障害物の位置推定手法の検討, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ2015論文集, pp.244-245 (2015).

[15] Gibson, J., Haseler, C., Lassiter, H., Liu, R., Morrow, G., Oslund, B., Zrimm, M. and Lewin, G.: Lighthouse localization for unmanned applications, *Proc. 2016 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS'16)* (2016).

[16] Ng, A.K.T., Chan, L.K.Y. and Lau, H.Y.K.: A low-cost lighthouse-based virtual reality head tracking system, *Journal of IEEE 2017 International Conference on 3D Immersion (IC3D 2017)* (2017).

推薦文

関西支部では支部大会において優れた内容の論文に対し推薦論文を選定することとした。そこで、支部大会で発表された論文のうち6ページに満たないものを除く39件を対象とし、各セッションの座長および実行委員から広く推薦を集めて候補論文を選出した。各論文に対し事後評価者2名の評価を加え、実行委員会による審議を経て2件の推薦論文候補を決定した。本論文では、現代のモバイル・ユビキタスコンピューティングにおける重要課題である位置推定を扱い、各ノードが360度カメラを搭載する場合に、カメラを用いて周囲ノードが放つ光の方角を計測することで、従来のGPSによる位置推定精度をさらに向上できることを示している。重要課題に関して新規の方法による精度向上を実現しており、その貢献から、推薦論文として相応しいと考えられる。

(情報処理学会関西支部支部長 吉川正俊)



川濱 悠 (学生会員)

2016年大阪府立大学工学域電気電子系学類卒業。2018年大阪府立大学大学院工学研究科電気・情報系専攻修士前期課程修了。



勝間 亮 (正会員)

2006年京都教育大学教育学部情報数学科卒業。2011年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士後期課程修了。同年より大阪府立大学工学研究科助教。モバイルコンピューティング、センシング等の研究に従事。